EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE DIAFRAGMA RÍGIDO O FLEXIBLE PARA EL EMPLEO DEL MÉTODO SIMPLIFICADO EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA

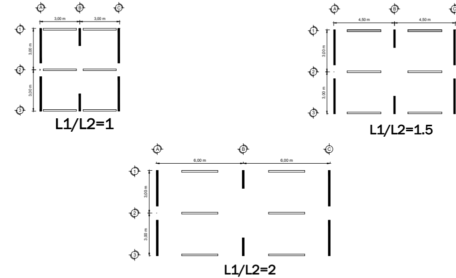
JOSÉ ANTONIO CORTÉS BENÍTEZ

DR. ARTURO TENA COLUNGA



Características de los modelos en estudio

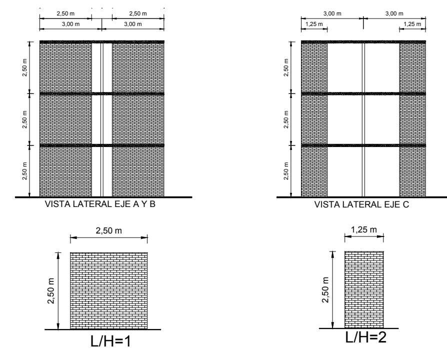
Para el estudio de la condición de rigidez o flexibilidad de diafragma de los sistemas de piso en estructuras que cumplen con todas las limitantes del método simplificado, se utilizaron tres diferentes relaciones de aspecto de la planta (L1/L2): 1, 1.5 y 2, las cuales están dentro del límite actualmente considerado por el método (L1/L2≤2).



Antecedentes

- La rigidez del sistema de piso en estructuras de mampostería juega un papel importante en la distribución de fuerzas horizontales en los elementos de resistencia lateral.
- La diferencia entre un diafragma rígido y uno flexible puede ser muy grande y crear errores significativos en el análisis de edificios con muros de mampostería.
- Con respecto a la posibilidad de flexibilidad del diafragma, la restricción del método simplificado en cuanto a la relación de aspecto de la planta de la estructura parece acotar razonablemente esta condición con respecto a lo que se ha observado en algunos estudios paramétricos disponibles en la literatura para sistemas de piso de concreto reforzado con base en losas macizas o perimetralmente apoyadas.
- Sin embargo, esta condición no se ha revisado para los otros dos sistemas de piso que se utilizan también hoy en día en estructuras de mampostería de baja altura: vigueta y bovedilla y losa aligerada con bloques de espuma de poliestireno.

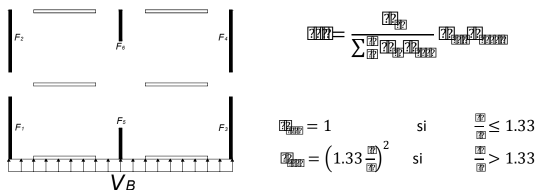
En los modelos se adoptaron dimensiones comúnmente utilizadas en casa habitación como son altura de entrepisos, espesor de muros y densidad de muros en planta.



Método simplificado

El método considera que la fuerza cortante que toma cada muro o segmento es proporcional a su área transversal y únicamente se verificará que en cada entrepiso la suma de la resistencia al corte de los muros de carga, proyectados en la dirección en que se considera la aceleración, sea por lo menos igual a la fuerza cortante total que actúe en dicho entrepiso.

Al emplear este método se permitirá ignorar los efectos por torsión, momentos de volteo, flexibilidad de diafragma y desplazamientos horizontales.



[illegible] = [illegible]

[illegible] $= 1$ si [illegible] ≤ 1.33

[illegible] $= \left(1.33\,\text{[illegible]}\right)^2$ si [illegible] > 1.33

Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas para el análisis y diseño de los diferentes sistemas de piso se definieron con base en manuales de diseño y construcción de sistemas de vigueta y bovedilla, así como de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004 2004) y Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-2004 2004).

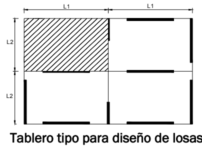
Para los módulos de elasticidad de secciones con base en concreto (vigueta, dalas, losas y firmes).	[illegible]
Para el módulo de elasticidad de la mampostería	[illegible]
Para el módulo de elasticidad de la bovedilla	[illegible]
Para el módulo de elasticidad del casetón (EPS)	[illegible]

Diseño de losas macizas de concreto

El diseño de este sistema de piso se hizo con las especificaciones de las NTCC-2004

Propiedades mecánicas de materiales		
	f'c (kg/cm²)	E (kg/cm²)
-Losa de concreto	250	221,359
-Mampostería de ladrillo rojo recocido	15	9,000

Peralte total de losas macizas perimetralmente apoyadas	
L_1/L_2	Peralte total (cm)
1	9
1.5	11
2	12



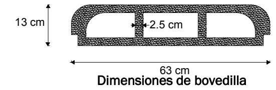
Tablero tipo para diseño de losas

Diseño de losas con vigueta y bovedilla

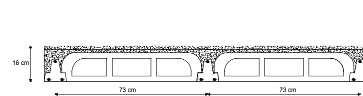
Para el diseño del sistema de piso de vigueta y bovedilla se utilizo el manual técnico de la empresa De Acero.

Con todas las recomendaciones contenidas en el manual obtuvimos las siguientes piezas y dimensiones:

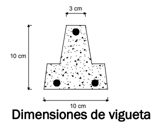
Propiedades mecánicas de elementos		
	f'c (kg/cm²)	E (kg/cm²)
-Vigueta	350	261,916
-Bovedilla	40	32,000
-Firme de compresión	200	197,990



Dimensiones de bovedilla



Dimensiones de la configuración del sistema de piso



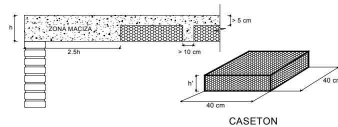
Dimensiones de vigueta

Diseño de losa reticular aligerada

El diseño de este sistema de piso se hizo con las especificaciones de las NTCC-2004

Propiedades mecánicas de materiales		
	f'c (kg/cm²)	E (kg/cm²)
-Losa aligerada	250	221,359
-Casetón	1.2	108
-Mampostería de barro rojo recocido	15	9,000

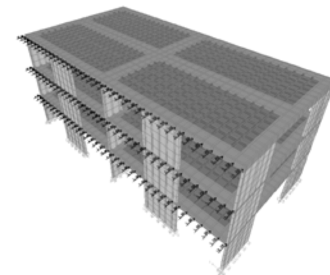
Para el diseño se supusieron algunos valores, como es el espesor de la losa de compresión, zonas macizas adyacentes a los muros, estos valores son los mínimos recomendados por las NTCC-2004

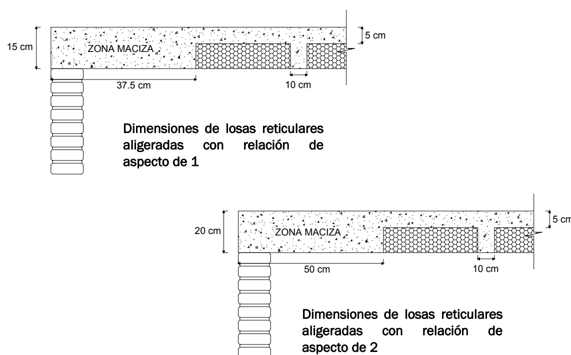


CASETON

Análisis de los modelos

Para evaluar la potencial condición de flexibilidad de diafragma de los sistemas de piso en estudio, se realizaron análisis elásticos ante carga lateral uniformemente distribuida en el sistema de piso con el programa SAP 2000 versión 12.0.0.

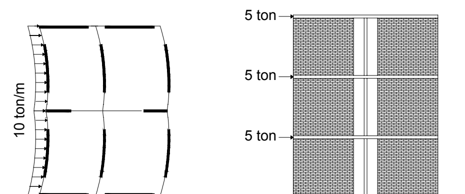

Modelado con elemento finito en SAP 2000



Dimensiones de losas reticulares aligeradas con relación de aspecto de 1

Dimensiones de losas reticulares aligeradas con relación de aspecto de 2

Para el análisis se aplicaron sobre las losas cargas laterales (LTR) de 10 ton/m en cada nivel, las cuales representan cargas por sismo, aplicando cargas puntuales de 5 ton a cada 50 cm distribuidas uniformemente a lo largo de uno de los bordes del sistema de piso en los nodos de la malla en la dirección de análisis.

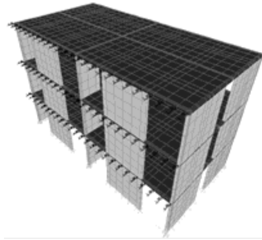


Distribución de fuerzas laterales para el análisis

Modelos con losas macizas perimetralmente apoyadas

➢El modelado de este sistema de piso fue el más simple de todos, dado que es razonable suponer que sus propiedades en sus dos direcciones ortogonales principales son las mismas.

➢Por lo tanto, en los elementos tipo cascarón grueso se emplearon los mismos espesores de diseño para calcular las rigideces de membrana y flexión, tanto en la discretización de la losa como en los muros.



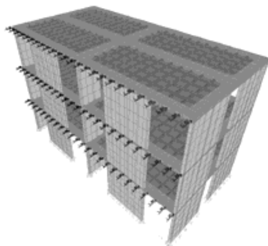
Propiedades mecánicas de materiales		
	f'_c (kg/cm²)	E (kg/cm²)
-Losa maciza de concreto	250	221,359

Propiedades geométricas de losas de concreto		
L1/L2	Espesores (cm)	
	Membrana	Flexión
1	9	9
1.5	11	11
2	12	12

Modelos con losas reticular aligeradas

➢Dado que el módulo de elasticidad del bloque de espuma de poliestireno es muy bajo con respecto al del concreto, para fines prácticos, no se modeló la rigidez de los bloques de espuma de poliestireno.

➢Por lo tanto, la complejidad consistió en modelar con exactitud las nervaduras, las zonas de casetones (sólo el firme de concreto) y las zonas macizas conforme al diseño del sistema de piso.



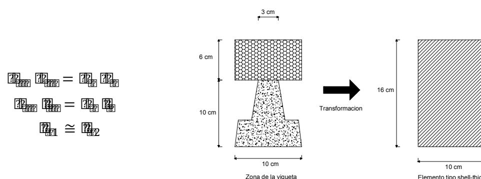
Propiedades geométricas de los elementos para losas reticulares con relación de aspecto de 2		
Elemento	Espesor *t* (cm)	
	Membrana	Flexión
-Zona de casetón	5	5
-Zona de nervadura	20	20
-Zona maciza	20	20

Propiedades geométricas de los elementos para losas reticulares con relación de aspecto de 1 y 1.5		
Elemento	Espesor *t* (cm)	
	Membrana	Flexión
-Zona de casetón	5	5
-Zona de nervadura	15	15
-Zona maciza	15	15

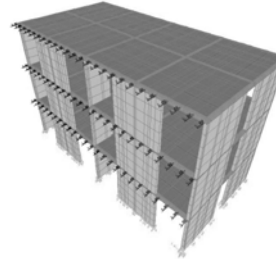
Modelos con vigueta y bovedilla

Dadas las características del sistema de piso donde hay diferencias geométricas de viguetas y bovedillas en sus direcciones principales, que ocasionan que sus propiedades en la dirección paralela a las viguetas sean distintas a la dirección perpendicular a ellas y, se optó por utilizar un modelado ortotrópico en el elemento tipo cascarón grueso.

Además, fue necesario hacer equivalencias de las secciones transformadas "reales" a secciones prismáticas, teniendo cuidado de mantener el comportamiento del sistema de piso después de la transformación.



Debido a la configuración de este sistema de piso, los anchos de membrana calculados después de la transformación difieren considerablemente en cada dirección, por lo que en la dirección perpendicular se modificaron los módulos de rigidez haciéndolos variar linealmente en función del espesor de membrana obtenido

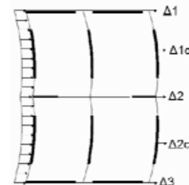


Propiedades mecánicas de sección transformada (kg/cm²)		
	Bovedilla	Vigueta
E_{P1}	47,854	230,967
E_{P2}	15,241	75,600
G_{P12}	19,939	96,236
G_{P13}	76,196	394,334

Propiedades geométricas de los elementos para losas con vigueta y bovedilla		
Elemento	Espesor *t* (cm)	
	Membrana	Flexión
-Zona de bovedilla	12.88	16
-Zona de vigueta	12.3	16

Deformaciones laterales de modelos con losa maciza perimetralmente apoyada

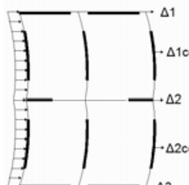
Desplazamientos laterales (m) de los modelos con losa perimetralmente apoyada															
	L1/L2=1					L1/L2=1.5					L1/L2=2				
Nivel	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc
1	0.0254	0.0255	0.0254	0.0255	0.0255	0.0383	0.0386	0.0383	0.0385	0.0385	0.0503	0.0508	0.0503	0.0507	0.0507
2	0.0581	0.0582	0.0581	0.0582	0.0582	0.0882	0.0886	0.0882	0.0885	0.0885	0.1158	0.1166	0.1158	0.1164	0.1164
3	0.0854	0.0856	0.0854	0.0855	0.0855	0.1295	0.1298	0.1295	0.1297	0.1297	0.1704	0.1710	0.1704	0.1709	0.1709



$L_1/L_2=2$					
ENTREPISO	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc
1	0.0503	0.0508	0.0503	0.0507	0.0507
2	0.1158	0.1166	0.1158	0.1164	0.1164
3	0.1704	0.1710	0.1704	0.1709	0.1709

Deformaciones laterales de modelos con losa reticular aligerada

Desplazamientos laterales (m) de los modelos con losa reticular aligerada															
	L1/L2=1					L1/L2=1.5					L1/L2=2				
Nivel	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc
1	0.0224	0.0225	0.0224	0.0225	0.0225	0.0361	0.0364	0.0361	0.0364	0.0364	0.0436	0.0442	0.0436	0.0441	0.0441
2	0.0482	0.0484	0.0482	0.0483	0.0483	0.0807	0.0811	0.0807	0.0810	0.0810	0.0939	0.0947	0.0939	0.0945	0.0945
3	0.0679	0.0681	0.0679	0.0680	0.0680	0.1160	0.1164	0.1160	0.1163	0.1163	0.1323	0.1329	0.1323	0.1327	0.1327

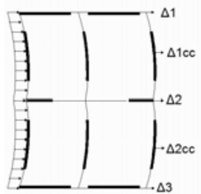


$L_1/L_2=2$					
ENTREPISO	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc
1	0.0436	0.0442	0.0436	0.0441	0.0441
2	0.0939	0.0947	0.0939	0.0945	0.0945
3	0.1323	0.1329	0.1323	0.1327	0.1327

Deformaciones laterales de sistemas de piso con vigueta y bovedilla

Desplazamientos laterales (m) de los modelos con vigueta y bovedilla

	L1/L2=1					L1/L2=1.5					L1/L2=2				
Nivel	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc
1	0.0238	0.0240	0.0238	0.0239	0.0240	0.0389	0.0396	0.0389	0.0394	0.0394	0.0532	0.0551	0.0532	0.0547	0.0546
2	0.0532	0.0534	0.0531	0.0533	0.0534	0.0905	0.0914	0.0905	0.0911	0.0911	0.1261	0.1286	0.1261	0.1279	0.1279
3	0.0769	0.0772	0.0768	0.0771	0.0771	0.1337	0.1345	0.1336	0.1343	0.1343	0.1891	0.1911	0.1891	0.1906	0.1906



$L_1/L_2=2$					
Nivel	Δ1	Δ2	Δ3	Δ1cc	Δ2cc
1	0.0532	0.0551	0.0532	0.0547	0.0546
2	0.1261	0.1286	0.1261	0.1279	0.1279
3	0.1891	0.1911	0.1891	0.1906	0.1906

Índice de Ju-Lin

Ju y Lin demuestran que para valores de:

R<0.2 la hipótesis en el análisis de diafragma rígido es bastante aproximada teniendo errores menores al 20% en la obtención de elementos mecánicos en los elementos más demandados

R>0.45 el error en el análisis haciendo la hipótesis de diafragma rígido lleva a errores de más del 40% en los elementos más demandados.

$$R = \frac{\Delta_{flexible} - \Delta_{rígido}}{\Delta_{flexible}}$$

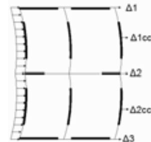
Índice de Ju y Lin para los sistemas de piso en estudio

	Losa perimetralmente apoyada			Losa reticular aligerada			Vigueta y bovedilla		
Nivel	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$
1	0.3720	0.3932	0.3932	0.2891	0.3570	0.3019	0.3318	0.4067	0.4372
2	0.4938	0.5140	0.5136	0.3902	0.4690	0.4008	0.4477	0.5280	0.5575
3	0.5452	0.5623	0.5627	0.4283	0.5118	0.4371	0.4955	0.5773	0.6080

Índice de rigidez propuesto por FEMA 368

En el documento FEMA-368 se plantea un índice de rigidez (R_{F-368}) con el cual se propone diferenciar que tipo de hipótesis debemos utilizar para el análisis.

$$R_{F-368} = Max\left\{\begin{array}{l}\dfrac{\Delta_{1cc}}{0.5(\Delta_1+\Delta_2)}\\ \dfrac{\Delta_{2cc}}{0.5(\Delta_2+\Delta_3)}\end{array}\right.$$



$R_{F-368} > 2$ el análisis debe de hacerse tomando en cuenta la flexibilidad del diafragma.

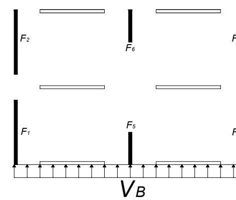
$R_{F-368} \leq 2$ el sistema de piso se comporta razonablemente como diafragma rígido.

Índice de FEMA-368 para los sistemas de piso en estudio

	Losa perimetralmente apoyada			Losa reticular aligerada			Vigueta y bovedilla		
Nivel	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$
1	1.0022	1.0020	1.0030	1.0017	1.0023	1.0036	1.0042	1.0049	1.0094
2	1.0009	1.0011	1.0017	1.0008	1.0012	1.0019	1.0019	1.0024	1.0046
3	1.0008	1.0008	1.0010	1.0006	1.0009	1.0014	1.0019	1.0016	1.0028

Comparación de fuerzas cortantes

Para valorar las imprecisiones que se obtienen en la estimación de las fuerzas cortantes atraídas por los muros conforme al método simplificado según las NTCM-2004 (2004) con respecto a un análisis más aproximado mediante el método del elemento finito, se determinaron las fuerzas cortantes en cada muro en la dirección de análisis empleando ambos métodos. Se tomó como referencia el cortante basal (o de planta baja), por ser el crítico de diseño.



Factores de área efectiva

MURO	H/L	F_{AE}
Exteriores	1	1.00
Interiores	2	0.44

[illegible]

Índice de Ju-Lin

Ju y Lin (1999) proponen un índice de rigidez el cual se utiliza para diferenciar un diafragma rígido de uno flexible.

$$R = \frac{\Delta_{flexible} - \Delta_{rígido}}{\Delta_{flexible}}$$

Desplazamientos laterales (m) para un diafragma infinitamente rígido

Nivel	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$
1	0.3720	0.3932	0.3932
2	0.4938	0.5140	0.5136
3	0.5452	0.5623	0.5627

Cortantes basales normalizados V_{EF}/V_{MS} en los muros para losa perimetralmente apoyada

Muros	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$
Eje A	0.9697	0.9620	0.9572
Eje B	1.1223	1.1698	1.2019
Eje C	0.9697	0.9620	0.9572

Cortantes basales normalizados V_{EF}/V_{MS} en los muros para losa reticular aligerada

Muros	$L_1/L_2=1$	$L_1/L_2=1.5$	$L_1/L_2=2$
Eje A	0.9654	0.9587	0.9470
Eje B	1.1768	1.2139	1.3220
Eje C	0.9654	0.9587	0.9470

Cortantes basales normalizados V_{EF}/V_{MS} en los muros para vigueta y bovedilla

Muros	L_1/L_2=1	L_1/L_2=1.5	L_1/L_2=2
Eje A	0.9690	0.9645	0.9627
Eje B	1.1517	1.1600	1.1670
Eje C	0.9746	0.9676	0.9608

Comparación de rigidez relativa entre sistemas de piso

Para obtener una comparación relativa entre los sistemas de piso que se analizaron en este estudio con respecto a un diafragma infinitamente rígido, se propone modificar el índice propuesto por Ju y Lin, de manera que el desplazamiento del sistema de piso infinitamente rígido sea el divisor de referencia, es decir:

$$R_R = \frac{\Delta_{flexible} - \Delta_{rígido}}{\Delta_{rígido}}$$

Índice propuesto en este estudio para los sistemas de piso en estudio

	Losa perimetralmente apoyada			Losa reticulares aligerada			Vigueta y bovedilla		
Nivel	L_1/L_2=1	L_1/L_2=1.5	L_1/L_2=2	L_1/L_2=1	L_1/L_2=1.5	L_1/L_2=2	L_1/L_2=1	L_1/L_2=1.5	L_1/L_2=2
1	0.5925	0.6479	0.6480	0.4067	0.5551	0.4324	0.4980	0.6867	0.7767
2	0.9754	1.0576	1.0559	0.6399	0.8831	0.8831	0.8113	1.1193	1.2598
3	1.1987	1.2849	1.2868	0.7491	1.0484	1.0484	0.7764	1.3661	1.5508

Comentarios finales

Conforme a los resultados del estudio, que incluyó el modelado razonablemente detallado de las estructuras tipo con elementos finitos, los sistemas de piso en particular, a partir de la evaluación de la potencial condición de flexibilidad de diafragma a través de varios índices de rigidez propuestos en la literatura, y de la comparación de las fuerzas cortantes actuantes en los muros obtenidas con el método simplificado con respecto a las obtenidas de un análisis más preciso con elementos finitos, se llegan a las siguientes conclusiones:

1. Para el tipo de estructuras estudiadas y su geometría, la condición de rigidez de diafragma se cumple razonablemente para los tres sistemas de piso en estudio.

2. Por ello, y para fines prácticos, se puede emplear con confianza el método simplificado para estructuras de estas características, ya que las subestimaciones máximas en las fuerzas cortantes que actúan en los muros se encuentran en intervalos de valores razonables, y por ende, tolerables.